

2015年時点のエネルギー原単位の推定

(鉄鋼部門-転炉鋼)

平成30年10月26日

RITE システム研究グループ

RITE は、平成24年9月25日に「2010年時点のエネルギー原単位の推計（鉄鋼部門-転炉鋼）」のレポート(http://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/Comparison_EnergyEfficiency2010steel.pdf) [1]において、2010年時点における鉄鋼部門の転炉鋼のエネルギー原単位の国際比較分析結果を掲載した。この分析は、国際学術誌の査読論文として採用されている Oda et al.[2]の推計手法に基づくものである。

本レポートは、最近入手可能になった各種データに基づき2015年時点の鉄鋼部門-転炉鋼のエネルギー原単位の推計を行い、それについてまとめたものである。実効性のあるCO₂排出削減を促すためにも、ここで行った技術レベルをできる限り正しく反映した世界各国のエネルギー原単位の推計は、重要性の高いものであると考えている。

1. 推計方法の概要

鉄鋼部門は、鉄鉱石を主な鉄源として製鉄を行う高炉転炉法、鉄スクラップ（加工屑、老廃屑）を鉄源とする電炉法に大別される[2]。電炉法はエネルギー消費量が小さくCO₂排出量が少ないといった優位性があるものの[3]、世界全体で見ると鉄スクラップの入手可能性に制約がある。技術改良に伴い（老廃屑を鉄源とした）電炉鋼での幅広い鋼材製造が可能になりつつあるが、依然として冷延鋼板、めっき鋼板などは転炉鋼からの製造が技術的・経済的に不可欠である。そのため、高炉転炉法と電炉法のエネルギー原単位を分けて推計することが重要である。しかし、IEA統計（エネルギーバランス表）[4]では、高炉転炉法と電炉法に分離したエネルギー消費量が示されておらず、それら合計が記載されているため、それぞれの消費量を推計するには工夫が必要である。また、鉄鋼部門は各種エネルギー・半製品の受入・外販も盛んである（例えば、コークスの輸出入、副生ガスの外販、銑鉄やスラブの受入・外販）。これらを考慮しつつ、バウンダリーの調整を適切に行った上で、エネルギー原単位の推計を行う必要がある。

本レポートでは、以上の点を踏まえ、次に示す複数の手法を用いることにより、世界主要国別に2015年時点の転炉鋼エネルギー原単位の推計を行った。

世界統計に基づく手法

A: IEA 統計（エネルギーバランス表）[4]と worldsteel 集計の粗鋼生産量[5][6]に基づく手法

データ積み上げによる手法

B1: 企業の環境報告書、鉄鋼協会の報告書に基づく手法

B2: 技術普及率に基づく手法

B2-1: 副生ガス回収有効利用率

B2-2: 5 つの技術（CDQ、TRT、焼結機クーラ排熱回収、熱風炉排熱回収、PCI）の普及率

B2-3: 旧技術（平炉、造塊・分塊法）の普及率

B3: IEA が試算した地域別省エネポテンシャル[7]を参照する手法

B4: 還元材比を参照する手法

なお、本推計の主な前提は次の通りである。

- ・ トン粗鋼当たりの一次エネルギー消費量（GJ/t 粗鋼）に着目、低位発熱量（LHV）ベース
- ・ 電力は、自家発電を含む火力発電の世界平均の発電効率を念頭に置き、全地域で $1\text{MWh}=3.6/3=10.8\text{GJ}$ として換算
- ・ 熱（IEA 統計での“Heat”）は、地域別のエネルギー転換効率で一次エネルギーへ換算
- ・ コークス、副生ガス、電力などを含め、鉄鋼部門において正味で消費したエネルギー量をカウント（図 1 を参照）
- ・ 転炉鋼生産量当たりの銑鉄生産量を本レポートでは「銑鋼比」と呼び、全ての地域の銑鋼比を 2005 年世界平均値である 1.025 へ補正

上記の手法 A（IEA 統計（エネルギーバランス表）に基づく手法）は、地域網羅性があるという強みがある一方、その結果が実態を反映したものであるのか、あるいは統計的な不備によるものかの判断が容易ではないという弱みもある。上記の手法 B（データ積み上げによる手法）は地域網羅性が低く間欠的データしか得られないものの、具体性があり要因と結果との因果関係がより明確であるという強みがある。このように手法により強みと弱みがあり、互いに弱みをカバーしつつ互いの強みを活かせるよう、これら複数の手法を組み合わせることとした。

本レポートのバウンダリーを図 1 に示す。図 1 の中央黒枠内を分析対象とした。本レポートでのバウンダリーは、いわば「コークスや焼結鉱を自前で製造し熱延鋼帯を製造した場合」に相当する。冷間圧延やめっき加工といった工程を分析対象外とすることで、鋼種構成による影響を除去することを狙っている。

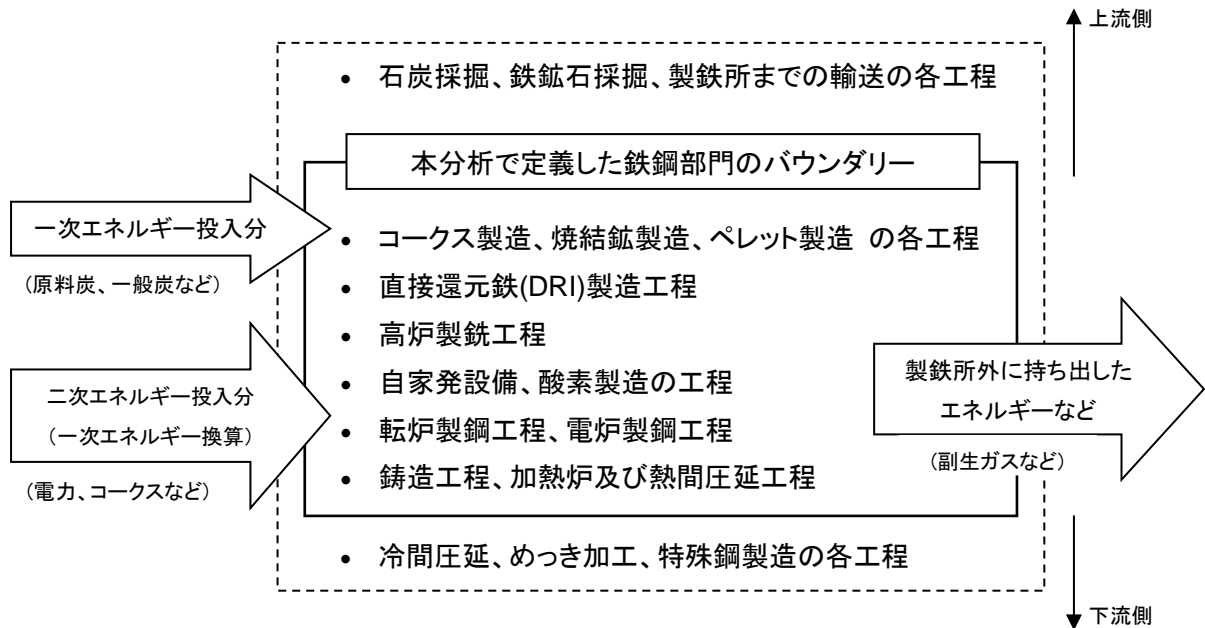


図 1 本分析で定義した鉄鋼部門のバウンダリー概略図

注) 概略図では、分かりやすさを優先し、エネルギーのループ構造を省いて図示している。実際には、副生ガス、蒸気、電力など複雑なループ構造を有するが、本分析ではこれらエネルギーの正味の消費分をカウントしている。

銑鋼比 (= 銑鉄生産量 / 転炉鋼生産量) の補正に関して、2005 年実績推計、2010 年実績推計の際には、文献[8]に基づき 20.64GJ/(t 銑鉄/t 転炉鋼) の係数を用いた。これは、転炉鋼 1t 当たりの銑鉄生産が 100kg 増加した場合、見かけ上 2.064 (GJ/t 粗鋼) エネルギー原単位が悪化したと考え、2.064 (GJ/t 粗鋼) を差し引く補正を行うことを意味する¹。

本推計 (2015 年実績推計) では補正手法を変更し、銑鉄生産量に比例するエネルギー消費基準値を 20.44 (GJ/t 銑鉄)、粗鋼生産量に比例するエネルギー消費基準値を 6.15 (GJ/t 転炉鋼) とした。この補正により、基準値比でどの程度のエネルギー消費原単位であるかを把握できる。従来の手法では銑鉄のエネルギー原単位を世界均一値で補正していたため、2015 年実績推計時に用いる本補正の方がより適正と考えられる。

2015 年の銑鋼比は米国 0.87、ドイツ 0.93、日本 1.00、フランス 1.03、インド 1.53、といったように地域差が大きいですが、この補正により比較可能なエネルギー原単位となる。エネルギー原単位の推計に際して生産量は worldsteel[5][6]に基づく。中国については別途考察を行

¹ 高炉一貫製鉄所における溶銑比(hot metal ratio)について、企業が技術開発を行い溶銑比の低減を図る例も見られる。この溶銑比低減に伴い転炉鋼当たりのエネルギー原単位は大きく改善される。この効果を含めた国際比較については文献[2]に譲り、本分析では銑鋼比補正を行うこととする。

うが、その考察を行う際には中国側の文献に記載されている生産量を参照する。なお、中国の銑鋼比は2010年1.04、2015年0.92と低下が著しく[5][6]、中国側文献による銑鋼比も同様の傾向を示している。銑鋼比低下の理由として、電炉向け・鋳物向け・輸出向けの銑鉄生産量が減少した影響も大きいと考えられるが、そもそもこのような急激な銑鋼比低下が実態を反映したものであるのか、今後とも生産統計について注視していく必要がある（本分析では上記の2015年0.92を参照しつつ銑鋼比の補正を行う）。

2. 世界統計に基づく手法【手法A】

世界統計に基づく手法（手法A）は、IEA統計（エネルギーバランス表）[4]に基づき算定した鉄鋼部門エネルギー消費量を、worldsteel集計の粗鋼生産量[5][6]で除することにより、エネルギー原単位（GJ/t粗鋼）を推計する手法である。

鉄鋼部門におけるエネルギー消費量を算定するにあたって、次の2点が課題となる。

- ・鉄鋼部門のバウンダリーの調整
- ・高炉一貫製鉄所、スクラップ電炉、DRI電炉のエネルギー消費の分割

課題の1点目に関して次の通り対応した。IEA統計（エネルギーバランス表）[4]の中で最も詳細なExtended Energy Balancesを参照する。Extended Energy Balancesにおいて、コークス炉ガス、高炉ガス、転炉ガスがそれぞれ分かれて記載されており情報量が多い。このExtended Energy Balancesを読み解いていくことで図1に示したバウンダリーに基づくエネルギー消費を算定できる。具体的には、輸入し鉄鋼業にて用いたコークスについては、その製造段階におけるエネルギー投入分（世界平均値）を加算した。また、外販された副生ガスを除外した（ただし、その電力が再び鉄鋼業において使用する場合は発電用燃料とした副生ガスを再度加算した）。

課題の2点目については、表1に示した「生産方式別の標準的なエネルギー原単位」を導入し、電炉鋼に関するエネルギー消費相当分を差し引くことで、転炉鋼のエネルギー消費量を推計した。地域によって「転炉鋼のエネルギー原単位は劣っており、スクラップ電炉鋼のエネルギー原単位は優れている」といった状況も考えられるが、これを許容すると一意に解が得られないため、標準的なエネルギー原単位比で見て生産方式によらず同値の比のエネルギー原単位であるとした（例えば、3つの生産方式の何れも標準的なエネルギー原単位比で1.05倍など）。

表 1 生産方式別の標準的な一次エネルギー原単位 (RITE 想定)

(GJ/t 粗鋼)	非電力	電力	合計
転炉鋼	22.3	4.8	27.1
スクラップ電炉鋼	2.5	6.3	8.8
直接還元鉄 (DRI) 電炉鋼	15.9	7.6	23.5

注1) 転炉鋼の銑鋼比は 1.025 の場合。

注2) 直接還元鉄 (DRI) 電炉鋼は、天然ガスを燃料とする場合を想定。

注3) 電力を含む「合計」のエネルギー消費を参照する方が基本的に望ましいが、一部地域では電炉率が高かったり、高機能鋼材、特殊鋼などの製造比率が高く下工程での電力消費が大きかったりする。そのようなケースでは「非電力」の方が転炉鋼のエネルギー原単位として参考となる。

以上の方法により算定した地域別・時点別の転炉鋼一次エネルギー原単位を図 2 に示す。IEA 統計 (エネルギーバランス表) [4]には統計上の不備も含まれており、この点について IEA 自身も認めている[3]。そのため図 2 では、統計上の不備が確認された米国、ロシア、インドなどについて記載を行わなかった。このように IEA 統計[4]の不備もあるものの、図 2 に示す通り、各地域の絶対値水準に加え、時系列で見た相対的な変化についても情報を得ることができ、これは本手法 A の特長と言える。

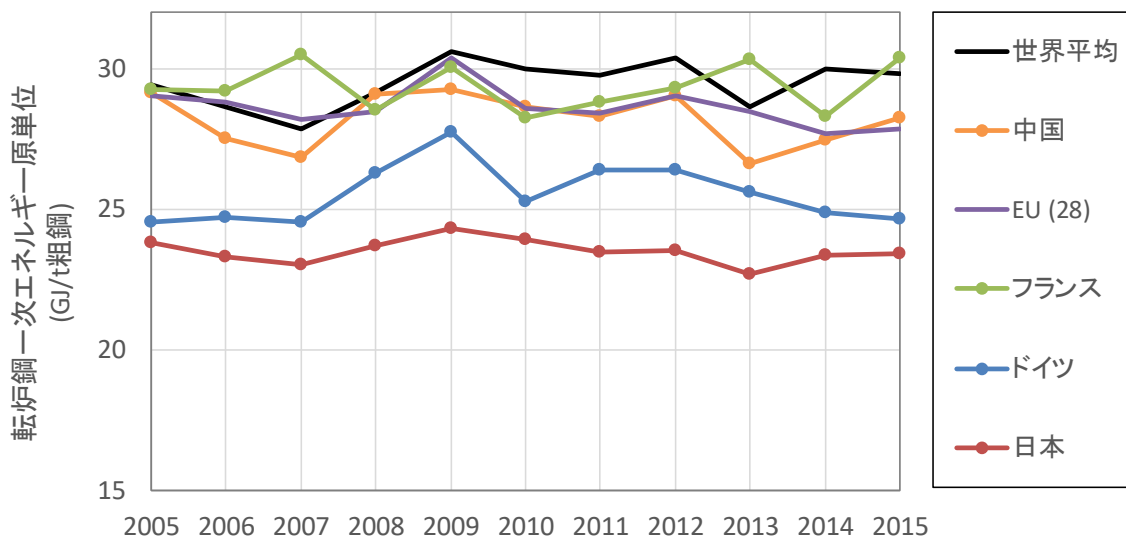


図 2 世界統計に基づく転炉鋼エネルギー原単位の推移

注1) バウンダリー調整済み。転炉鋼の銑鋼比は 1.025 の場合へ補正済み。

注2) EU (28)の凡例は、ドイツ、フランスも含む。

注3) 生産規模の大きい中国と世界平均の間に乖離が生じているが、これは本図で示していない南アジア、旧ソ連、北米、南米などにおけるエネルギー原単位が大きいことによる。

3. データ積み上げによる手法【手法 B】

世界統計に基づく手法 A は、これまで見てきた通り地域網羅性があり時系列推移についても情報を得ることができるという優位性がある一方、地域別のエネルギー原単位の実態を反映しているのか統計上の不備によるものかの見分けが容易でないといった課題がある。

そのため、IEA 統計（エネルギーバランス表）[4]に頼らないデータ積み上げによる手法も併せて整理・参照する必要がある。本試算にあたっては、次のような幅広い複数の手法を参照した。以下、特に参考になった内容について示す。

(1) 企業の環境報告書、鉄鋼協会の報告書に基づく手法【B1】

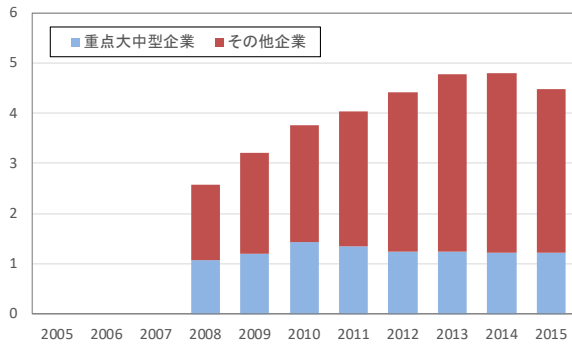
手法 B1 では、企業や各国の鉄鋼協会が報告したエネルギー原単位を参照する。例えば、日本については日本鉄鋼連盟[9]に基づき算定した結果、2010 年からの 5 年間累積で 1.34% の改善（銑鋼比の影響を差し引き後）と評価される。ドイツは、ドイツ鉄鋼協会[10]によると同期間において 1.7% の改善であり、銑鋼比の影響も考慮すれば正味で 2.4% の改善と評価される。インドは、政府文書[11]において SAIL、RINL、TATA、JSW のエネルギー原単位が示されており、企業別粗鋼生産量で加重平均した結果、同期間において 2.8% の改善と評価される。このように手法 B（データ積み上げによる手法）では変化率を算定する 경우가多く、これを 2010 年時点の地域別エネルギー原単位（既存推計値）[1]と組み合わせて算定する。

中国は生産規模が大きく、同時に中国国内において多様性があることから、より慎重なデータ収集・整理を行った。図 3 に重点企業・その他企業別のコークス生産量、銑鉄生産量の推移を示す（中国統計ベース）。銑鉄生産のほとんどは重点企業によるものであるが、コークス生産の過半はその他企業による[12]。コークス生産に関して、重点企業は CDQ 普及率が高いとされるが、その他企業を含めた全国の状況については不明な点が多い。

重点企業の高炉を炉内容積（total volume）別に整理した内容を図 4 に示す（中国統計[12]ベース）。高炉 1 基当たりの平均炉内容積は 2005 年、2010 年、2015 年においてそれぞれ 780 m³、1120 m³、1300 m³ と拡大傾向にある。ただし、依然として 2015 年時点で 2000 m³ 以下の高炉の生産能力が（生産能力ベースで見ても）過半を占める点にも留意が必要である。ここから、暗に 2015 年時点の TRT 発電原単位はあまり高くないことが予想される（2010 年時点で TRT 発電原単位は 25kWh/t 溶銑と報告されている[13][14]）。

表 2 に重点企業のプロセス別のエネルギー原単位を示す（中国統計[12]ベース）。2007 年まで算定方式変更により不連続となっている項目があり注意が必要である。表 2 の「粗鋼 1t 当たりの総合エネルギー原単位(kgce/t)」に着目すると 2010 年 605→2015 年 572 と 5.0% ポイント改善したと算定される。その他企業の銑鉄生産量が図 3 に示した通り縮小していることも考慮すると、中国（全国）で 2010 年から 2015 年にかけて 10.3% ポイント改善したと評価できる。もしこのような改善が実態に即しているのであれば、かなり大幅なエネルギー原単位の改善が進んだと言える。

機械式コークス生産量(単位:億 t/年)



銑鉄生産量の推移(単位:億 t/年)

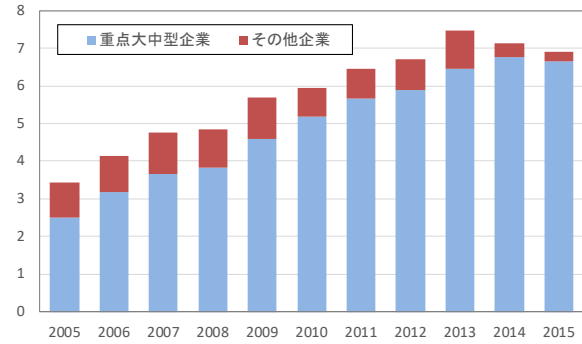
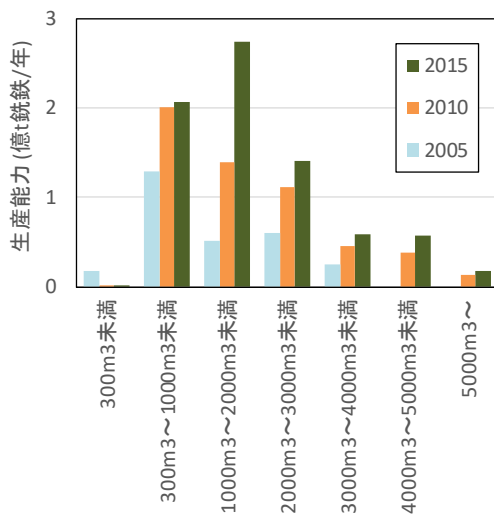


図 3 重点企業・その他企業の生産量の推移【中国統計[12]ベース】

注) 凡例の「重点大中型企業」は、より正確には 2011 年以降「中国鋼鉄工業協会(CISA)会員企業」のデータである。

各時点における生産能力(億 t 銑鉄/年)



各時点における生産能力のシェア(%)

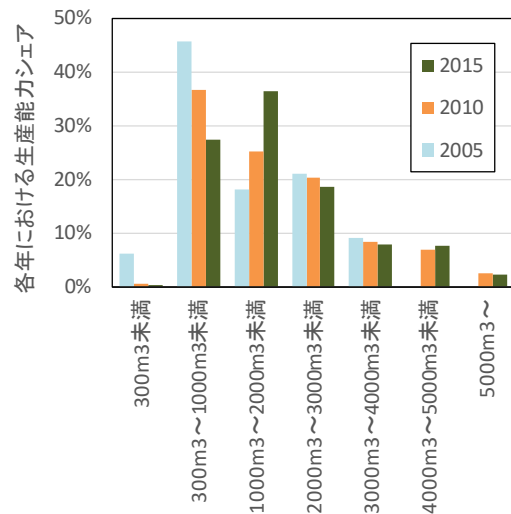


図 4 重点企業の高炉の炉内容積分布【中国統計[12]ベース】

注) 2010 年までは「重点大中型企業」のデータ、2015 年は「中国鋼鉄工業協会(CISA)の会員企業」のデータ。

ここで、留意が必要なのは、中国統計データの整合性(信頼性)である。表 3 に重点企業の副生ガスの状況を示す(中国統計[12]ベース)。表 3 に基づくと 2015 年時点で副生ガスの放散率がゼロへ漸近している。2015 年の転炉ガス回収量は 108m³と示されている一方、中国統計[12]において「2010 年の転炉ガス発生量は 80m³~100m³」と記載されている。つまり 2015 年は発生量を上回る回収量が提示されているとも読める。この例からも、中国統計デ

一タの整合性（信頼性）については識者間においても議論があるものと推測される。このため本レポートでは先に挙げた「中国（全国）で2010年から2015年にかけて10.3%ポイント改善」をそのまま採用せず、本情報を一つの参考情報として扱う。

表 2 重点企業のエネルギー原単位の推移【中国統計[12]ベース】

	粗鋼1t当たりの 総合エネルギー 原単位(kgce/t)	焼結 (kgce/t)	ペレット (kgce/t)	コークス (kgce/t)	銑鉄 (kgce/t)	電炉 (kgce/t)	転炉 (kgce/t)	圧延 (kgce/t)
2005	694	65	40	142	457	97	36	76
2006	645	56	33	123	433	81	9	65
2007	628	55	30	122	427	81	6	63
...								
2010	605	53	29	106	408	74	0	62
...								
2015	572	47	28	100	387	60	-12	58

注) 2010年までは「重点大中型企業」のデータ、2015年は「中国鋼鉄工業協会(CISA)の会員企業」のデータ。2005年から2007年にかけて非連続の個所あり。kgceは、標準石炭kgを意味する。

表 3 重点企業の副生ガスの状況【中国統計[12]ベース】

	コークス炉ガス 放散率	高炉ガス 放散率	転炉ガス 放散率	回収量
2005	5.7%	8.4%		
...				
2010	1.8%	5.3%	9.6%	81 m ³ /t
...				
2015	1.0%	2.0%		108 m ³ /t

注) 2010年までは「重点大中型企業」のデータ、2015年は「中国鋼鉄工業協会(CISA)の会員企業」のデータ。

(2) 技術普及率を参照する手法【B2】

次に、地域別の技術普及率を参照する。技術普及率を参照することにより、エネルギー原単位の地域差が生じている理由を本質的に説明することができる。ここでは、技術の特性に注目し次の3区分別にそれぞれ積み上げ的に推計を行った。

B2-1 : 副生ガス回収有効利用率

B2-2 : 5つの技術 (CDQ、TRT、焼結機クーラ排熱回収、熱風炉排熱回収、PCI) の普及率

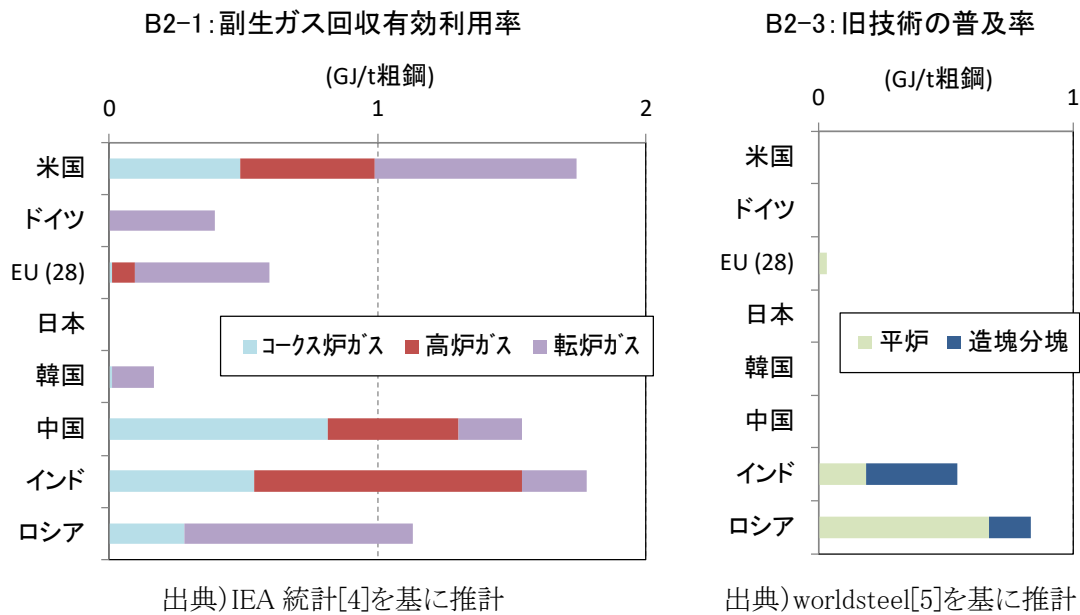
B2-3 : 旧技術 (平炉、造塊・分塊法) の普及率

補足) CDQ : コークス乾式消火設備 (Coke Dry Quenching)

TRT : 高炉炉頂圧発電 (Top pressure Recovery Turbine)

PCI : 高炉微粉炭吹込み (Pulverized Coal Injection)

図 5 に現状の技術普及状況に基づき推定したエネルギー原単位改善ポテンシャルを示す。図中の B2-1、B2-2 はこれら技術が理想的に普及した場合の省エネポテンシャル、B2-3 はそれぞれ転炉、連続鑄造へ理想的に更新された場合の省エネポテンシャル量を意味する。このようなポテンシャルが存在する分だけエネルギー原単位が高い (劣る) はずである、との考え方をういた。



B2-2: 5つの技術の普及率

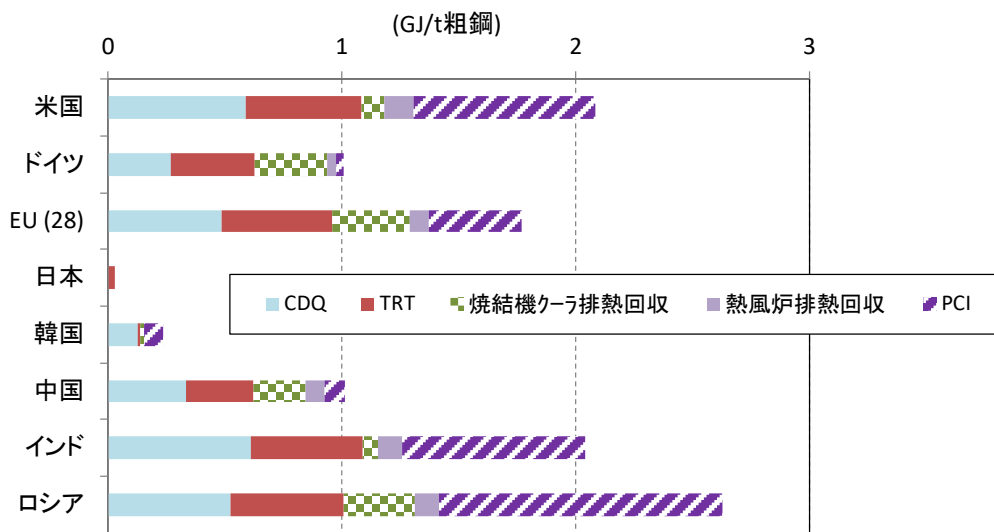


図 5 手法 B2 (技術普及率に基づく手法) にて参照した省エネポテンシャル

注1) 本図で示した改善ポテンシャルは「普及数ベース」ではなく「実省エネ量ベース」である。例えば、中国の重点企業の TRT 普及率 (普及数ベース) は 2010 年時点で 90~95%とされるが、これら TRT の発電量は 25kWh/t 溶銑である[13][14]。本図において TRT は 50kWh/t 溶銑の省エネポテンシャルがあるとして作図している。

注2) 本図で示した改善ポテンシャル (B2-1: 副生ガス回収有効利用率) の中国の値は、中国統計[12]ベースではなく、IEA 統計[4]を基に推計した値である。これら文献間に相当な差異があり注意が必要である。

(3) IEA[7]が試算した地域別省エネポテンシャルを参照する手法【B3】

IEA[7]は高炉転炉法の BAT 普及による省エネポテンシャルを示している(図 6)。図 6 の注意点として、1) この省エネポテンシャル(GJ/t steel)は電炉鋼含めた全粗鋼を分母としている点、2) 欧州などの地域を集約し表示している点、3) 2011 年実績を対象としている点、などが挙げられるが、重要な情報の一つであり、本分析においても参照した。IEA はその後、更新した省エネポテンシャルを示しておらず、図 6 が本レポート作成時点で最新のものである。

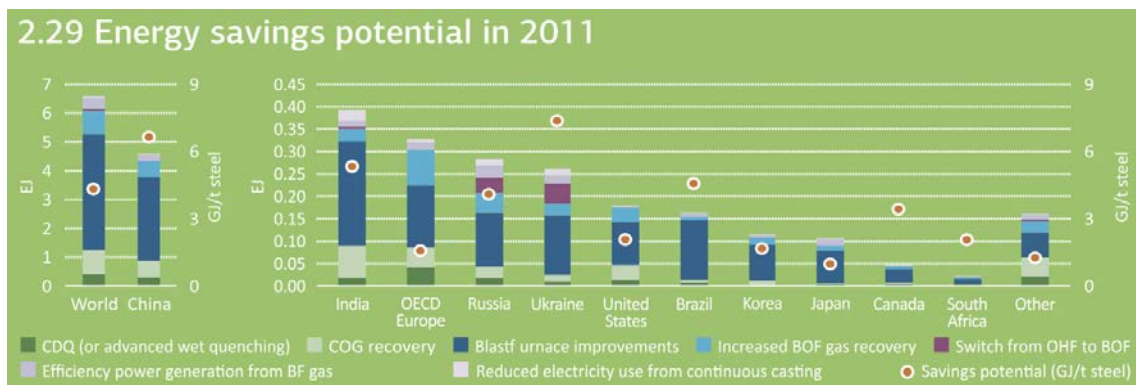


図 6 IEA[7]が示した高炉転炉法の BAT 技術普及による省エネポテンシャル

(4) 地域別還元材比を基に算定する手法【B4】

以上の通り、地域別の情報を可能な限り収集・整理してきたが、依然として情報量が不足している地域も散見される。そこで、還元材比を参照する手法 (B4) も援用する。

文献[18]に基づき整理した還元材比を図 7 に示す。還元材比に関して、日本、韓国のように省エネ技術普及率の高い地域は、高圧操業、酸素富加、TRT、PCI、副生ガス焼きコンバインドサイクル発電などの影響が大きく、還元材比は製鉄所全体のエネルギー原単位水準に直結する訳ではない。他方、省エネ技術普及率が低位の地域、例えば、図 5 に示した米国、インド、ロシアなどの場合、還元材比は製鉄所全体のエネルギー原単位と相関がより高いと考えられる。

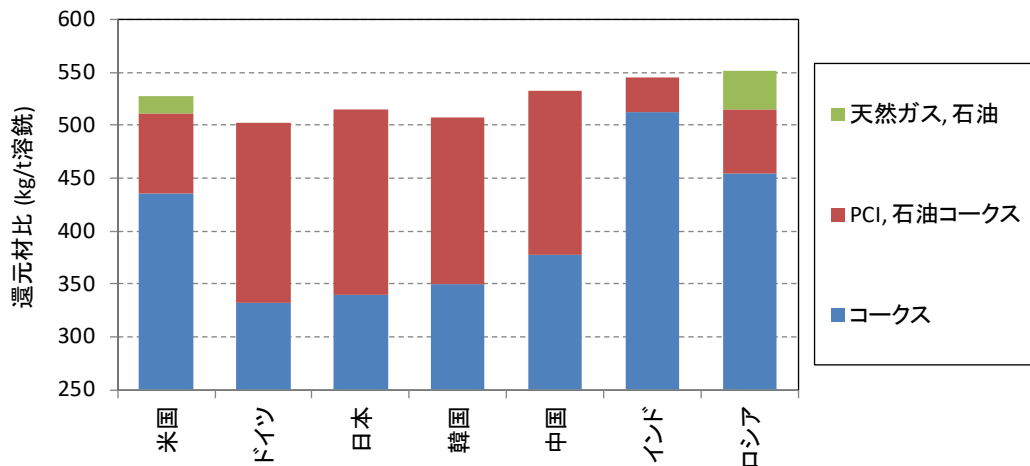


図 7 還元材比の整理

引用) 文献[18]に基づき RITE 整理

4. まとめ

以上の各手法によって推計されたエネルギー原単位(暫定値)を相互に比較しつつ、整合性や相対的な信頼性に基づき地域別の転炉鋼エネルギー原単位の最終推計を行った。2015年実績の推計結果を図8に、また時系列推移も併せた結果を図9にそれぞれ示す。これらの図から(また以上の全分析を基に考察すると)転炉鋼のエネルギー原単位について次のことが示唆される。

- 世界平均を見ると、エネルギー原単位がゆるやかに改善している。
- 日本、韓国がとりわけ優れたエネルギー原単位を維持している。
- これは、副生ガスの回収有効利用率、各種省エネ設備の普及率の差異などに起因する
- 2009年前後にかけて稼働率低下を余儀なくされた地域もあり、2005年比で見て2010年のエネルギー原単位が悪化した地域も散見されるが、2015年についてはエネルギー原単位の改善が多く地域で見られる(米国、欧州など)。
- ドイツ、英国では省エネ設備普及が一部で進んでおり[16]、2015年に改善が見られるのはこの影響もあると考察される(逆に言えば、依然として省エネ余地が豊富である)。
- 中国では2010年まで大幅な改善が見られたが、2015年までの5年間は改善幅が小さいとの推定結果である。この要因として、米国、英国、フランスとは逆に中国は2010年の稼働率が高く、2015年の稼働率が低下した影響が挙げられる(後の付録にて詳述)。
- ロシア、ウクライナについて、2005年以降エネルギー原単位の大幅な改善がみられる(これは平炉などの旧技術の更新による影響が大きいと考察される)。

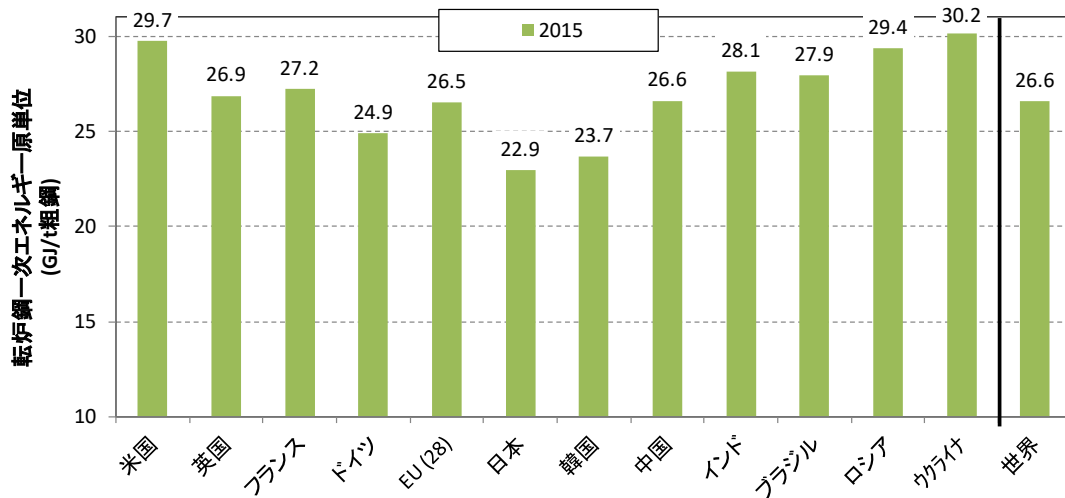


図 8 2015 年の転炉鋼一次エネルギー原単位推計結果

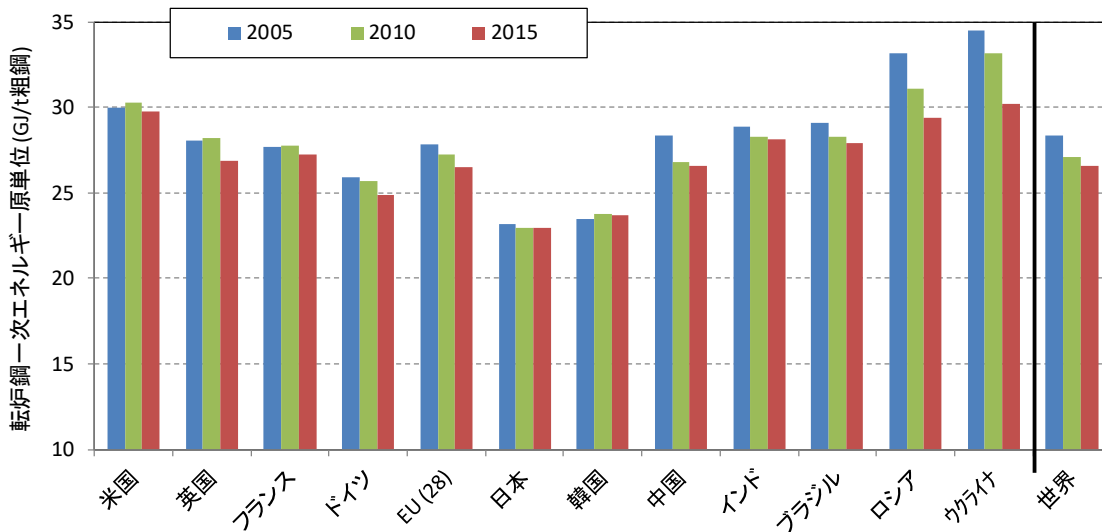


図 9 転炉鋼一次エネルギー原単位推計値の推移 (2005年・2010年・2015年)

付録：中国についての考察

中国は世界の粗鋼生産量の過半を占め、本レポートでもより慎重なデータ収集・整理を行った。中国のエネルギー原単位は図 9 に示す通り、2010 年まで大幅な改善が見られたが、2015 年までの 5 年間は改善幅が小さいと推定された。この要因として、2010 年までの 5 年間の新設比率が著しく高いこと（銑鉄生産量で見て、2010 年は 2005 年の 1.73 倍と飛躍的に増加したが、2015 年は 2010 年の 1.16 倍にとどまる[12]）の他、稼働率の影響も考えられる。

中国の高炉の稼働率と、仮にその稼働率変化の影響がなかった場合（稼働率を 2015 年時

点の 88%に固定した場合) の仮想的なエネルギー原単位推計値を表 4 に示す。以上の分析結果から次のことが考察される。

- ・ 2010 年時点は稼働率が相対的に高い(2005 年、2015 年と比較し 6.4 ポイント程度高い)。
- ・ 稼働率を 2015 年時点の 88%に補正した場合、2010 年のエネルギー原単位は+0.4 GJ/t 粗鋼と評価され、従って過去 10 年において継続してエネルギー原単位の改善が進んだと言える(「2010 年以降にエネルギー原単位の改善が停滞した」とは必ずしも言えない)。

表 4 中国の高炉の稼働率、及びそれを補正した場合の一次エネルギー原単位
中国会員企業の高炉の稼働率
(=銑鉄生産量/銑鉄生産能力) 稼働率を 88%に補正した場合の
転炉鋼一次エネルギー原単位<参考値>

中国会員企業の高炉の稼働率 (=銑鉄生産量/銑鉄生産能力)		稼働率を 88%に補正した場合の 転炉鋼一次エネルギー原単位<参考値>		
	稼働率	(GJ/t粗鋼)	本推計	稼働率を88%へ補正した場合
2005	87.9%	2005	28.3	28.3
2010	94.4%	2010	26.8	27.2
2015	88.0%	2015	26.6	26.6

補足) 中国鋼鉄工業協会(CISA)
の会員企業ベース
出典) 文献[12]に基づき RITE 推計

出典) 日本鉄鋼業について分析した既往
研究を参考としつつ RITE 推計

なお、本レポートで示した鉄鋼業のエネルギー原単位国際比較は、データ不足の中(一部で相互に矛盾するデータが存在する中) 行ったものであり、そもそも意欲的な研究課題である。今後とも、推計方法の更新、最新情報の収集に取り組む予定である。

参考文献

- [1] RITE:「2010 年時点のエネルギー原単位の推計(鉄鋼部門-転炉鋼)」,平成 24 年 9 月 25 日, RITE システム研究グループ. https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/Comparison_EnergyEfficiency2010steel.pdf (アクセス日 2018.9.26)
- [2] Junichiro Oda, Keigo Akimoto, Toshimasa Tomoda, Miyuki Nagashima, Kenichi Wada, Fuminori Sano: International comparisons of energy efficiency in power, steel, and cement industries, Energy Policy, 44, pp.118-129, 2012.
- [3] IEA: Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions, 2007.
- [4] IEA: World Energy Balances 2017, CD-ROM, 2017.
- [5] Worldsteel: Steel Statistical Yearbook, 2011-2016.
- [6] worldsteel: World Steel in Figures, 2012-2017.
- [7] IEA: Energy Technology Perspectives 2014, 2014.
- [8] 新日本製鐵株式会社, J F E スチール株式会社, 住友金属工業株式会社, 株式会社神戸製

- 鋼所, 一般社団法人日本鉄鋼連盟: 「中華人民共和国における鉄鋼産業に係る省エネルギー・環境対策に関する基礎調査」, NEDO 委託, 管理番号 100011639, 2008 年 3 月.
- [9] 経済産業省: 平成 28 年度 産業構造審議会 産業技術環境分科会 地球環境小委員会 鉄鋼ワーキンググループ 資料 4-3 データシート, 日本鉄鋼連盟, 2017.
- [10] ドイツ鉄鋼協会 (2017). http://www.jernkontoret.se/globalassets/publicerat/forskning/forskningspubl/proceedings-2nd-isij-vdeh_jernkontoret-2017.pdf (アクセス日 2018.3.28)
- [11] Gov. of India, Ministry of Steel: Annual Report 2016-17, 2017. <http://steel.gov.in/annual-reports> (アクセス日 2017.11.22)
- [12] 中国鋼鉄工業年鑑編集部編: 「中国鋼鉄工業年鑑」 中国鋼鉄工業年鑑編集部, 2005-2016.
- [13] 王維興: 「2010 年重点鉄鋼企業能耗述評」, 世界金属導報, 3 月 8 日, 2011.
- [14] 王維興: 「鉄鋼工業能耗現状和節能潜力分析」, 中国鉄鋼業, 4 月, 2011.
- [15] M. Arens, E. Worrell: Diffusion of energy efficient technologies in the German steel industry and their impact on energy consumption, *Energy*, 73, 968-977, 2014.
- [16] M. Arens, E. Worrell, W. Eichhammer: Drivers and barriers to the diffusion of energy-efficient technologies — a plant-level analysis of the German steel, *Energy Efficiency*, 10, 441-457, 2017.
- [17] M. Schulz, K.P.P. Leuchtman, J.H. Chung, Y.M. Kang: Using modern coke oven technology at the new Hyundai Steel coke plant, 2015. https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/media/download_1/coke_plant/tkis-aist-2015-paper-using_modern_coke_oven_technology_at_hyundai_steel.pdf (アクセス日 2018.3.6)
- [18] 一般社団法人日本鉄鋼連盟: 「鉄鋼統計要覧 2017」, 2017.